原 著

角度計測誤差がpresampled MTFへ及ぼす影響の検証と
角度計測の最適手法の提案東出 了・市川勝弘¹⁾・國友博史・大橋一也・川野 誠論文受付
2008年 8 月28日論文受理
2008年11月12日

Code No. 522

名古屋市立大学病院中央放射線部

1)金沢大学大学院医学系研究科保健学専攻

緒 言

デジタル撮影システムのmodulation transfer function (MTF)を測定する際、デジタル特有のエリアシングエラーを含まないpresampled MTFを求める必要がある。MTF測定において代表的なスリット、エッジ、および矩形波チャート(それぞれ、スリット法、エッジ法、および矩形波チャート法)を媒体に用いてpresampled MTFを求めるには、Fujitaらの方法¹⁾のようにこれらの媒体を2~3°傾けて撮影し、十分に細かい実効サンプリング間隔を有する合成プロファイルを得る方法が有効である。この際に、正確なpresampled MTFを算出するためには合成プロファイルを正確に作成することが必要となり、そのためのパラメータの

なかで傾斜角度は実効サンプリング間隔を直接決めるため、精度の求められる重要な因子となる。われわれは以前にエッジ法において、一定間隔のbinを用いて合成プロファイルを作成する方法を提案し、その際に計測角度の誤差は0.05°以内にする必要があると報告²⁾した。しかし、これらの角度計測の重要性については、過去の研究報告において十分に議論されておらず、正確な角度を決定する手法は現在まで明確には示されていない。

本研究ではスリット法、エッジ法、および矩形波チャート法における傾斜角度の計測誤差が、presampled MTF値へ及ぼす影響の程度をシミュレーションによって明らかにした。また、角度計測の手法とし

Influence of Angle-measurement Error on Pre-sampled MTF and Proposal of an Optimal Technique of Angle Measurement

Ryo Higashide, Katsuhiro Ichikawa,¹⁾ Hiroshi Kunitomo, Kazuya Ohashi, and Makoto Kawano

Central Department of Radiology, Nagoya City University Hospital

1) Division of Health Sciences, Graduate School of Medical Science, Kanazawa University

Received August 28, 2008; Revision accepted Nov. 12, 2008; Code No. 522

Summary

The presampled modulation transfer function (MTF) is recognized as the established metric for characterizing the resolution performance of a digital imaging system. In the past, the three general approaches for assessing the presampled MTF were using the angulated slit, angulated edge, and angulated square-wave test pattern all of which are tilted slightly against the column direction of the detector. In all methods, it is important to determine the exact angle of the respective test devices. In this study, we examined the influence of angle-measurement error in three test devices and the optimal technique of angle measurement. These results demonstrated that the influences of angle-measurement error in each method were equal. We also investigated three angle-measurement techniques using trace of objects, Hough transfer, and comparative observation of synthetic profiles. These results suggested that the technique using synthetic profiles was the most optimal technique in the angle measurement. Through use of the technique, angle-measurement error was completely overcome. This technique will contribute to improved accuracy of presampled MTF measurements.

Key words: modulation transfer function (MTF), digital imaging system, presampled MTF, angle別刷資料請求先：〒467-8602 名古屋市瑞穂区瑞穂町字川澄1番地
名古屋市立大学病院 中央放射線部 東出 了 宛

Fig. 1 Schematic diagram of a method for creating the synthetic edge profile with a regular data interval from the angled edge's image.

て、画像のトレースによって角度を求める方法、画像のハフ変換によって角度を求める方法、プロファイルを視覚的に観察して角度を求める方法において検証を行い、正確な角度決定における最適手法について検討した。

1. 方法

1-1 合成プロファイルの作成方法

Buhr³⁾は、エッジの傾斜角度により合成に使うライン数の決定を行い、理論的には不均等となる合成後の各点の配置を、均等な間隔で調整して合成プロファイルを得る方法を用いた。この方法では、理論的配置と調整後の配置の差が大きいほどMTFの結果に及ぼす誤差は大きくなった。われわれはこの方法を発展させ、以前の報告²⁾において、Fig. 1のように、均等間隔のbinによって複数のデータ点を平均する手法を提案し、良好な結果を得た。

この方法は、画像データのピクセル間隔 P とエッジの傾斜角度 θ によって定まるシフト幅 $P \times \tan \theta$ により、データ点をシフトさせながら投影する点ではBuhrらの方法と似ている。しかし、多くのデータ点を用いて均等間隔のbin内のデータ平均をとるため、ばらつきを軽減でき、特にエッジ法の微分操作においてデータ

の振動を抑制できるため有効である。用いるbin幅の設定はサンプリングピッチの10~20%程度とすることで、その幅の平均によるMTFへの影響に対する補正係数はナイキスト周波数で1.004~1.017と小さい。bin内のデータ数は傾斜角度が1~4°でわれわれが用いた180×180ピクセルの範囲にて合成を行えば約14点以上($1/\tan \theta$ が整数もしくはほぼ整数となる θ は除く)とすることができ、平均化による変動抑制効果が得られる。このため、今回はこの合成プロファイル作成法をエッジ法だけでなく、スリット法および矩形波チャート法にも用いることにした。

1-2 シミュレーション

1-2-1 画像データの作成

コンピュータシミュレーションによってガウス関数による既知のMTF(真値)を持ち、任意の角度だけ傾いたスリット、エッジ、矩形波チャートの画像を作成した。データの作成においては、まず元画像のデータをアナログ画像として近似し得るように、0.005mmの非常に細かい間隔で生成した。次に、このデータから矩形のサンプリングアパーチャを模擬した矩形領域の平均によってサンプリングして、デジタル画像データとした。作成画像のサンプリングピッチは

0.1mmとした。また、矩形波チャート像はKyokko Type 1(化成オプトニクス社)のチャートを参考にして、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0cycles/mmの周波数窓を持つように作成した。なお、画像データはMTFの測定において露光量変換を必要としない線形なデータとした。

1-2-2 スリット法におけるpresampled MTFの解析手順

スリット画像から傾斜角度 θ を求め、前述した合成プロファイルの作成方法によって均等な間隔の合成プロファイルを得る。この際にbin幅は、サンプリングピッチの10%となる0.01mmとした。われわれのエッジ法の検討²⁾では、この設定により、傾斜角度が1~4°であればナイキスト周波数におけるMTFの真値と測定値の誤差率は $\pm 0.5\%$ の範囲内に収まるという結果を得ている。この均等な間隔に合成されたline spread function (LSF)に対してtruncation error⁴⁾を防ぐために外挿処理^{5,6)}を行い、フーリエ変換⁷⁾によりpresampled MTFを算出する。ここで、用いたbinによる平滑化の補正を考慮する必要がある、bin幅に対応したsinc関数の逆数による補正⁸⁾を行う。この際に用いる補正係数 $C(f)$ は次式で表される。

$$C(f) = \frac{1}{\text{sinc}(\pi \cdot f \cdot d)} = \frac{\pi \cdot f \cdot d}{\sin(\pi \cdot f \cdot d)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

f : 空間周波数[cycles/mm]

d : bin幅の間隔[mm]

1-2-3 エッジ法におけるpresampled MTFの解析手順

エッジ画像から同様に均等な間隔の合成プロファイルを得る。この際もbin幅は、0.01mmとした。この合成されたedge spread function (ESF)に対して隣接差分による微分をすることでLSFを得る。LSFからpresampled MTF算出まではスリット法と同様に行う。また、binによる平滑化の補正は(1)式と同様に行い、更に隣接差分による微分に対する補正を(1)式の d を差分間隔[mm]とした式を用いて行った。

1-2-4 矩形波チャート法におけるpresampled MTFの解析手順

矩形波チャート画像から同様に均等な間隔の合成プロファイルを得る。この際もbin幅は、0.01mmとした。この合成した均等間隔のデータに対して市川らの方法⁹⁾を使ってpresampled MTFを算出した。市川らのフーリエ法の解析処理においては、整数周期分の波形データを正確に抽出することが重要である。本研究において抽出の始点と終点は以下のように半自動的に求めた。まず、各周波数窓の波形に対して最大値と最小値を検索し、その中間レベルに引いた水平

ラインと波形との交点を検索する。波形の各頂点の両側における二つの交点の中間点を求めることで頂点位置を推測し、その後、波形データの左端からと右端から2番目の頂点をそれぞれ始点と終点とした。検索結果はコンピュータ画面上に各周波数窓の波形とともに表示し、各検出点を視覚的に観察して適切かどうか判断して、不適切な場合は表示された波形上の点を補正した。また、binによる平滑化の補正を(1)式により行った。

1-3 傾斜角度の計測誤差の影響

コンピュータシミュレーションによってガウス関数による既知のMTF(真値)を持ち、過去の報告から妥当と思われる2および3°傾けたスリット像、エッジ像、矩形波チャート像を作成した。なお、画像サイズはスリット像およびエッジ像は180×180ピクセル、矩形波チャート像は818×180ピクセルとして、合成に用いるライン数は180とした。傾斜角度の計測誤差による影響を検証するため、各画像の傾斜角度2°に対して合成に用いる角度を $2 \pm 0.30^\circ$ の範囲で0.15°間隔となる1.70, 1.85, 2.00, 2.15, 2.30°とした際のpresampled MTFを求めた。また、各画像の傾斜角度3°に対しても同様に合成に用いる角度を2.70, 2.85, 3.00, 3.15, 3.30°とした際のpresampled MTFを求めた。

1-4 角度計測の手法による測定精度の比較

角度計測の手法として、画像のトレースによって角度を求める方法、画像のハフ変換によって角度を求める方法、およびプロファイルを視覚的に観察して角度を求める方法の三つの手法において測定精度の比較を行い、角度決定に適した手法の検討を行った。用いたハフ変換は、画像から線分や円を抽出する手法としてよく知られている。この検討ではスリットとエッジの画像を用いて検証を行った。矩形波チャートでの検証を除いたのは、矩形波チャート画像から傾斜角度を求める際も矩形波チャートのエッジ部分を使うことから、エッジにおける評価結果をそのまま適用できるためである。

画像のトレースによる方法では、汎用画像処理ソフトであるImageJ¹⁰⁾を用いた。画像表示を行い、それぞれの測定対象となる像に対して移動や拡大などを用いることで、Fig. 2の直線ABのように像の傾きに正確なトレースを行った。トレース後に、このソフトの計測機能を使って傾斜角度を求めた。

ハフ変換による方法では、スリット画像の直線部やエッジ画像にソーベルフィルタ処理を加えて検出した境界線に対して2値化を行い、ハフ変換処理^{11~13)}によって直線部の検出とその傾斜角度の計測を行っ

Fig. 2 Trace method.

Fig. 3 Method using the Hough Transform.
(a) slit image, (b) binary image, (c) analysis by Hough transform.

a | b | c

た。なお、2 値化の閾値は線部の最大信号値の約 90%から0.2%程度の間隔で最大信号値に向けて変化させて、算出される傾斜角度が一定の値を示したところで傾斜角度値とした。Fig. 3にハフ変換による方法にてスリット画像の傾斜角度を求める手順を示した。(a)のスリット画像に2 値化を行い、(b)の画像とする。2 値化した(b)の画像に対して、ハフ変換処理をすることで(c)画像のように直線検出を行う。ハフ変換処理では、直線検出を行う際に直線の傾斜角度を求めることから角度値が計測される。

プロファイルの観察による方法は、われわれが以前にエッジ法で提案した方法²⁾である。Fig. 1に示した過程で、binにて平均される前の投影データ点の分布をコンピュータ画面に表示する。単純な閾値処理によって求めた角度をもとにわずかな角度間隔(0.01°)

にて角度値を増減して、その分布の変化を観察する。角度誤差が大きい場合は、Fig. 4(a)(b)のようにプロファイルが幅を持った分布として観察され、誤差が小さくなるにつれてFig. 4(c)のように収束して1本の曲線のような分布となる。実験では、観察者がこの収束度合いを判断して、正しいと思われる角度を決定した。

各方法における測定精度の比較を行うために、コンピュータシミュレーションによって、傾斜の角度が1.43, 2.00, 2.52°となるスリット画像3枚およびエッジ画像3枚を作成した。画像およびプロファイルから角度を求める方法に対しては7名の診療放射線技師にて角度測定を行った。また、ハフ変換による方法では、コンピュータプログラムによる自動計測値を他の2法の結果と比較した。

Fig. 4 Profile method.
Created synthetic profiles for two angle errors of (a) 0.3°, (b) 0.1°, and (c) true angle.

a | b | c

Fig. 5 True MTF and calculated MTFs for angle errors in cases of true angle:
(a) 2° and (b) 3° on the slit method.

a | b

2. 結果

2-1 傾斜角度の計測誤差の影響

傾斜角度が 2 および 3° の各画像に対して、プロファイルの合成に用いる各角度によるpresampled MTFをFig. 5～7に示す。Fig. 5はスリット法, Fig. 6はエッジ法, Fig. 7では矩形波チャート法におけるpresampled MTFの変化を示した。

$\pm 0^\circ$ はTrue MTFにほぼ一致し, $\pm 0.15^\circ$ と $\pm 0.30^\circ$ においては+と-の結果はほぼ同様の誤差であった。また, Fig. 8はスリット法, エッジ法, 矩形波チャート法の傾斜角度が 2° の画像に対してプロファイルの合

成に用いる角度を 2° , $2 \pm 0.15^\circ$, $2 \pm 0.30^\circ$ とした際のpresampled MTF値とMTFの真値との差分を示した。

スリット法, エッジ法, 矩形波チャート法の角度計測誤差によるpresampled MTFへの影響はほぼ等しく, 画像の傾斜角度と合成に用いる計測角度の誤差が大きいほどpresampled MTFの値は低下した。ナイキスト周波数手前の 4.0 cycles/mm でMTF値の誤差は最大となった。また, 2 および 3° の異なる傾斜角度であっても, 角度の計測値と角度の真値との誤差が同等であればMTFの結果に与える影響もほぼ同等であった。

Fig. 6 True MTF and calculated MTFs for angle errors in cases of true angle: (a) 2° and (b) 3° on the edge method.

a | b

Fig. 7 True MTF and calculated MTFs for angle errors in cases of true angle: (a) 2° and (b) 3° on the square-wave method. Dark round markers denote measured data for respective square-wave frequencies.

a | b

Fig. 8 Deviation from the true MTF value of measured MTF as function of spatial frequency for (a) the slit method, (b) the edge method, and (c) the square-wave method.

a | b | c

Fig. 9 Comparison of standard deviations of measured angle by seven observers for two measurement methods (trace method and profile method). The observers measured the angles for three true angles that were set to the simulated slit and edge images.

2-2 角度計測の手法による測定精度の比較

Fig. 9は画像のトレースによる方法とプロファイルの観察による方法について、観察者7名における測定値のばらつきを標準偏差によって評価したものである。

画像のトレースによる方法では観察者間による測定結果のばらつきが大きくなった。また、測定結果の平均は真値が1.43, 2.00, 2.52°の場合にスリットにおいて1.31, 1.98, 2.45°となり、エッジにおいては1.40, 2.01, 2.56°となった。プロファイルの観察による方法では、観察者間のばらつきはほとんどなく、2.00°傾斜のスリット画像において観察者1名が+0.01°の誤差を示した以外は、真値に等しい値を計測した。一方、ハフ変換による方法では、真値の1.43, 2.00, 2.52°に対して測定結果はスリットでは1.42, 1.98, 2.48°, エッジでは1.41, 1.98, 2.48°となり、0.01~0.04°の測定誤差を示した。

3. 考 察

傾斜角度の計測誤差についてはスリット法、エッジ法、矩形波チャート法において同様の傾向を示し、角度誤差が大きいほどpresampled MTFの値は低下した。1-3の計測誤差の影響については合成に用いるライン数を180として検証を行ったが、実際のMTF測定ではスリット法およびエッジ法と比べて矩形波チャート法ではチャートの形状を考えると合成に用いるライン数は少なくなる。Fig. 10は、矩形波チャート法において合成に用いるライン数を100とした場合の角度誤差の影響を調べた結果である。

このように本論文で採用した多数データを使った合成方法では、合成のライン数が少なくなるとpresam-

pled MTFに対する角度誤差の及ぼす影響は減少する。この結果は矩形波チャート法における少ない合成ライン数が、有効に作用するとも考えられる。しかし、本合成法において合成ライン数の減少は1bin内に収まるデータ数を減少させることになり、合成後のプロファイルの誤差が生じやすくなる。このため、本合成法において合成ライン数を減らして角度誤差の及ぼす影響を小さくすることよりも、正確な角度測定に努めることの方が重要であることは明らかである。なぜなら、正確な角度決定は、多くの合成ライン数の使用を可能とし、binによる平均化をより有効なものとするためである。

角度計測の手法とその精度については、画像のトレースによる方法では測定の精度は画像上のラインやエッジ境界部をトレースする際の境界判別の個人差に依存することになる。このため、測定結果は観察者間の差が大きく、最も測定精度が低くなった。ハフ変換によって角度を求める方法ではわずかに真値との誤差を生じるが、比較的精度の高い測定が可能であった。プログラムの更なる改良・最適化によりプロファイルを視覚的に観察して角度を求める方法と同等程度の測定精度を確保することは可能と考えられる。しかし、この方法は2値化における閾値の決定基準が曖昧であることや採用するプログラムのアルゴリズムに依存して測定精度が変化するという点で汎用性に欠けるという問題点を持ち合わせている。それらに対して、プロファイルの観察による方法は容易なプログラムで実行可能であり、目視による角度調整を行うことで正確な角度計測ができる。Fig. 4(a)(b)のように角度誤差を生じた場合、この方法では、0.1°の角度誤差を含んだFig. 4(b)の場合において

Fig. 10 (a) True MTF and calculated MTFs for angle errors, and (b) Deviation from the true MTF value of measured MTF as function of spatial frequency, when the line number used for synthesizing the profile of the square waves was 100.

も明らかに角度の誤りを認識することができる。よって合成されたプロファイルの収束の度合い(合成点の集合が細い曲線となる度合い)を視覚的に確認しながら角度の決定をするこの方法は、観察者間のばらつきが生じにくく、正確な角度計測を可能とする。また、計測に要する時間もスリット画像3枚とエッジ画像3枚の計6画像に対して、プロファイルの観察による方法では7名の平均で1分51秒となり、1画像に対して19秒程度の時間にて計測を行える。画像のトレースによる方法においては7名の平均で8分50秒となり、これらは1画像に対して1分28秒程度となった。これらの結果より、プロファイルの観察による方法は測定精度が高く、かつ短時間で計測が可能であることが示された。以上のことから、傾斜角度計測の手法としてプロファイルの観察による方法が最適であると考えられる。なおこの方法を更に有効にするためには、プロファイルの変化を自動的に認識する手法の開発が有効であると考えており、その開発を今後の課題としたい。

4. 結 語

スリット法、エッジ法、矩形波チャート法のpresampled MTF測定において、傾斜角度の計測誤差が大きくなる程、測定結果の値は低下する傾向を示した。また、3法における角度誤差の影響はほぼ同じであり、合成に用いるライン数が多い程、影響が大きくなった。ライン数は合成プロファイルの合成精度に影響するために、これを多くするためにも傾斜角度を正確に計測することが重要である。角度計測の手法としてプロファイルを視覚的に観察して角度を求める方法が精度に優れる方法であり、この手法を用いることでpresampled MTFの測定精度に関わる重要な因子である傾斜角度の計測誤差についての問題を解決することが可能となった。

謝 辞

本研究に御協力いただきました当院中央放射線部諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Fujita H, Doi K, Giger ML, et al. Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6. MTFs of II-TV digital imaging systems. *Med Phys* 1985; 12(6): 713-720.
- 2) 東出 了, 市川勝弘, 國友博史, 他. エッジ法による presampled MTFの簡便な解析方法の提案と検証. *日放技学誌* 2008; 64(4): 417-425.
- 3) Buhr E, Günther-Kohfahl S, Neitzel U. Accuracy of a simple method for deriving the presampled modulation transfer function of a digital radiographic system from an edge image. *Med Phys* 2003; 30(9): 2323-2331.
- 4) 内田 勝, 金森仁志, 稲津 博 著, 日本放射線技術学会 編. 3-2 レスポンス関数. 放射線画像情報工学 I. 通商産業研究社, 東京, 1980: 181-187.
- 5) 桂川茂彦. 4 画像の評価. 医用画像情報学. 南山堂, 東京, 2002: 66-91.
- 6) 畑川政勝, 青木雄二, 朝原正喜, 他. 委員会報告. 増感紙-フィルム系のMTF測定におけるスリット法と矩形波チャート法の比較. *日放技学誌* 1996; 52(5): 701-708.
- 7) 小川智哉 監修, 渋谷道雄, 渡邊八一 著. Excelで学ぶフーリエ変換. 東京: オーム社, 2003.
- 8) Cunningham IA, Fenster A. A method for modulation transfer function determination from edge profiles with correction for finite-element differentiation. *Med Phys* 1987; 14(4): 533-537.
- 9) 市川勝弘, 國友博史, 櫻井貴裕, 他. 矩形波チャート像のフーリエ変換によるプリサンプリングMTFの新しい測定法. *日放技学誌* 2002; 58(9): 1261-1267.
- 10) Abramoff MD, Magelhaes PJ, Ram SJ. Image Processing with ImageJ. *Biophotonics International* 2004; 11(7): 36-42.
- 11) 田村秀行. 6 画像特徴の抽出. コンピュータ画像処理. オーム社, 東京, 2002: 181-206.
- 12) 谷口慶治. 7 2 値画像の処理. 画像処理工学-基礎編. 共立出版, 東京, 1996: 107-131.
- 13) 酒井幸市. 5 2 値化画像. デジタル画像処理入門. CQ 出版社, 東京, 2002: 63-100.

図表の説明

- Fig. 1 傾けたエッジ画像から規則的なデータ間隔となる合成エッジプロファイルを作成する方法の概要図
- Fig. 2 画像のトレースによる方法
- Fig. 3 ハフ変換による方法
(a)スリット画像, (b)2 値化画像, (c)ハフ変換解析
- Fig. 4 プロファイルによる方法
(a)0.3°および(b)0.1°の角度誤差によって作成された合成プロファイルと(c)正確な角度によって作成された合成プロファイル
- Fig. 5 スリット法において真の角度が(a)2°, (b)3°の場合に誤差を含んだ角度によって計算されたMTFと真のMTF
- Fig. 6 エッジ法において真の角度が(a)2°, (b)3°の場合に誤差を含んだ角度によって計算されたMTFと真のMTF
- Fig. 7 矩形波チャート法において真の角度が(a)2°, (b)3°の場合に誤差を含んだ角度によって計算されたMTFと真のMTF
マーカー(黒丸)は各周波数の矩形波から測定された値を示す.
- Fig. 8 測定されたMTF値に対するMTF真値からの偏差の空間周波数による変化
(a)スリット法, (b)エッジ法, (c)矩形波チャート法
- Fig. 9 観察者 7 名による二つの測定方法(トレース法およびプロファイル法)から求めた角度値の標準偏差の比較
観察者は真の角度値が既知である三つのスリットとエッジのシミュレーション画像の角度を測定した.
- Fig. 10 矩形波チャートのプロファイル合成のために使用するラインを100とした場合
(a)真のMTFと誤差を含んだ角度から計算されたMTF
(b)測定されたMTF値に対するMTF真値からの偏差の空間周波数による変化